# Über die Bestimmung der Reizschwelle der Hörempfindung aus Schwellendruck und Trommelfellimpedanz

Von der Technischen Hochschule zu Breslau
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

## Dissertation

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Werner Geffcken**
aus Rostock i. M.

Referent: Prof. Dr. E. Waetzmann
Korreferent: Prof. Dr. R. Suhrmann
Tag der mündlichen Prüfung: 9. 11. 1933

1 9 3 4

Johann Ambrosius Barth in Leipzig

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Sonderdruck aus „Annalen der Physik“
5. Folge, Band 19, Heft 8. 1934

Printed in Germany

# *Untersuchungen über akustische Schwellenwerte*[1])

## *III. Über die Bestimmung der Reizschwelle der Hörempfindung aus Schwellendruck und Trommelfellimpedanz*[2])

Inhalt: §1. Fragestellung. — §2. Zur Definition der Reizschwelle. — § 3. Theoretisches zur Methode. — §4. Bestimmung der Schwellendrucke. — § 5. Bestimmung der Trommelfellimpedanzen. — § 6. Ergebnisse; Kritik. — § 7. Zusammenfassung.

---

### § 1. Fragestellung

Es sind in früheren Jahren Methoden zur Bestimmung der Reizschwelle der Hörempfindung in größerer Anzahl angegeben worden[3]); da es indessen nicht gelang, auf den z. T. weit auseinanderliegenden Wegen Resultate von hinreichender Übereinstimmung zu erzielen, ist man in neuerer Zeit dazu übergegangen, die experimentellen und theoretischen Voraussetzungen der einzelnen Verfahren zu prüfen und diese selbst zu verbessern. Wenngleich auf diese Weise einige wesentliche Fortschritte in der Lösung von Widersprüchen und in der Aufdeckung von Fehlerquellen erzielt werden konnten, ist eine in jeder Weise überzeugende Lösung des Problems heute

---

1) Es liegen folgende Arbeiten aus dieser Untersuchungsreihe vor: I. E. Waetzmann u. H. Heisig, Über die Messung der Reizschwelle der Hörempfindung mit Resonanztelephonen. Ann. d. Phys. [5] **9**. S. 921. 1931. II. W. Geffcken u. L. Keibs, Das Thermophon und seine Verwendung als akustisches Meßinstrument. Ann. d. Phys. [5] **16**. S. 404. 1933. Im folgenden dienen die römischen Zahlen zur kurzen Kennzeichnung.

2) Über die bis Ende 1932 erzielten Resultate wurde in der Sitzung des Gauvereins Thüringen-Sachsen-Schlesien der Deutschen Physikalischen Gesellschaft am 7. 1. 1933 vorgetragen; vgl. E. Waetzmann und W. Geffcken, Physikal. Ztschr. **34**. S. 234. 1933.

3) Vgl. I., § 1.

noch keineswegs gelungen. Die vorliegende Arbeit verfolgt das Bestreben, auf der gleichen Linie einen Beitrag zur Überwindung der Schwierigkeiten zu liefern.

### § 2. Zur Definition der Reizschwelle

Wien definierte die Reizschwelle als die Energie, welche im *ungestörten* Schallfeld durch eine Fläche von der Größe des Trommelfells in der Sekunde hindurchwandert, wenn das an die gleiche Stelle gebrachte Trommelfell des Beobachters eben noch eine Hörempfindung vermittelt.[1]) Diese Formulierung umgeht also ausdrücklich die Berücksichtigung der durch die natürliche Lage des Trommelfells bedingten Veränderungen des Schallfeldes und ist daher physikalisch besonders einfach. v. Békésy berechnete die Korrekturen, durch welche die durch das Einbringen des Kopfes in das Schallfeld entstehenden Schallfeldverzerrungen berücksichtigt werden.[2]) Auf Grund dieser Reduktionen kann man folgende sowohl für Messungen im offenen wie für Messungen im geschlossenen Schallfeld[3]) anwendbare Definition aufstellen: Die Reizschwelle der Hörempfindung ist die Energie, welche an der Grenze der Hörempfindung vom Trommelfell aufgenommen werden würde, sofern sein akustischer Widerstand dem einer reflexionsfreien Leitung entspräche. In dieser Formel kann die Einschränkung fortfallen, wenn als weitere Korrekturen die Nachgiebigkeit und Schallaufnahmefähigkeit des Trommelfells berücksichtigt werden.[4])

Diese Begriffssetzung hat den Vorzug, unabhängig von der Lage des Schallgebers zum Ohr der Versuchsperson zu sein.[5])

---

1) M. Wien, Ann. d. Phys. [4] **62**. S. 759. 1920; vgl. auch I., S. 924.

2) G. v. Békésy, Ann. d. Phys. [5] **14**. S. 51. 1932.

3) Unter „geschlossenem Schallfeld" ist hier die Versuchsanordnung zu verstehen, bei der der Schallgeber luftdicht am Ohr der Versuchsperson liegt, während im „offenen Schallfeld" Schallgeber und Versuchsperson getrennt sind.

4) Vgl. § 4, S. 834, Anm. 3 bzw. § 5, S. 838 ff.

5) In der ersten Arbeit (I) dieser Untersuchungsreihe wurde definiert (S. 925): „Reizschwelle sei diejenige Leistung, die — im freien Schallfelde oder mit Schallgeber am Ohr — an der Grenze der Hörempfindung vom Gehörgang einschließlich Trommelfell (und dem unmittelbar angrenzenden Teil der Ohrmuschel) aufgenommen wird." v. Békésy hat inzwischen gezeigt (Ann. d. Phys. [5] **14**. S. 51. 1932), daß Ohrmuschel und Gehörgang selbst keine Energie aufnehmen. Vgl. hierzu auch § 5. Man kann also auch die hier angeführte Einschränkung aufgeben und hat dann eine mit der obigen völlig übereinstimmende Definition.

### § 3. Theoretisches zur Methode

Die Bestimmung von Schalldrucken[1]) ist eine Aufgabe, die sich mit den Mitteln der heutigen akustischen Meßtechnik sehr genau durchführen läßt; es ist daher verständlich, daß eine Reihe von Hörschwellenarbeiten hauptsächlich die Ermittelung der Schwellendrucke — d. h. derjenigen Schalldrucke, die vor dem Trommelfell eben noch eine Empfindung hervorrufen — zum Ziel haben. Der Verlauf der Schwellendruckwerte gibt eine für bestimmte Zwecke hinreichende Übersicht über die Hörfähigkeit der Versuchsperson; so ist z. B. der Arzt in der Lage, nach ihm die Hörverluste eines ohrkranken Patienten festzustellen. Die Reizschwelle kann indessen aus den Schwellendruckwerten allein nicht ermittelt werden; als zweite Versuchsreihe sind hierzu die den gleichen Meßfrequenzen zugeordneten akustischen Widerstände des Trommelfells der betreffenden Versuchsperson zu messen.

Der Zusammenhang zwischen Schwellendruck ($P = \sqrt{2}p_{\text{eff.}}$), Trommelfellimpedanz ($\mathfrak{z} = w + iq$)[2]) und der Reizschwelle ($L$) geht aus folgender Überlegung hervor. Bezeichnet man mit $U$ die Geschwindigkeit einer dem Trommelfell äquivalenten Kolbenmembran, so ist die gesamte sekundlich vom Trommelfell aufgenommene Energie

$$L = \tfrac{1}{2} F w U^2 \tag{1}$$

($F$ Fläche der dem Trommelfell äquivalenten Kolbenmembran)[3]). Es ist nun

$$U = \frac{P}{|\mathfrak{z}|} = \frac{P}{\sqrt{w^2 + q^2}}, \tag{2}$$

also

$$L = \frac{1}{2} F \cdot \frac{w}{w^2 + q^2} P^2. \tag{3}$$

---

1) Es wäre genauer von „Schallwechseldrucken“ zu sprechen, doch hat sich die kürzere Bezeichnung „Schalldruck“ heute allgemein eingebürgert.

2) Die hier verwendete Größe $\mathfrak{z}$ wäre richtiger als „Trommelfellimpedanz pro Flächeneinheit“ zu bezeichnen, vgl. K. Schuster im Handb. der Experimentalphysik XVII/2 („Technische Akustik“, herausgegeben von E. Waetzmann) S. 36; der Zusatz ist hier der Kürze halber weggefallen.

3) Die gesamte Trommelfelloberfläche wurde an einem Ohrausguß (vgl. I, S. 942/43) zu 0,9 cm² bestimmt. Legt man den Flächenfaktor $^1/_3$ zugrunde, so ergibt sich als Fläche der äquivalenten Kolbenmembran 0,3 cm² in hinreichender Übereinstimmung mit der Wienschen Festsetzung ($^1/_3$ cm²).

Führt man

$$\frac{\mathfrak{z}}{c\varrho} = \bar{w} + i\bar{q} \tag{4}$$

ein ($c$ Schallgeschwindigkeit, $\varrho$ Dichte der Luft, $c\varrho$ Impedanz der rein fortschreitenden Welle), so ergibt sich

$$\left\{ \begin{array}{l} L = \dfrac{\bar{w}}{\bar{w}^2 + \bar{q}^2} \cdot F \cdot \dfrac{P^2}{2c\varrho} \\ \text{oder} \\ L = u \cdot \dfrac{P^2}{2c\varrho} \cdot F = u \cdot F \dfrac{p_{\text{eff.}}^2}{c\varrho} . \end{array} \right. \tag{5}$$

$F \cdot \frac{P^2}{2c\varrho}$ ist die Energie, welche sekundlich durch die oben definierte Fläche senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung einer ebenen, rein fortschreitenden Welle hindurchtritt. Der Faktor $u$ bestimmt also das Verhältnis der tatsächlich aufgenommenen zur optimal aufnehmbaren Energie; er ist ein Maß für die Anpassung des Trommelfells an das angrenzende Schallfeld.[1])

Messungen der Trommelfellimpedanz, die von Tröger[2]) durchgeführt wurden, haben gezeigt, daß der schwingungsfähige Mechanismus des Ohres ein mehrfach gekoppeltes System darstellt. Die Gültigkeit der obigen Gleichungen wird hierdurch nicht umgestoßen, da auch bei beliebig komplizierten Systemen zwischen dem erregenden Druck und der Geschwindigkeit des unmittelbar angestoßenen Gliedes Proportionalität besteht. Der Proportionalitätsfaktor, d. h. der reziproke Wert der „Antriebspunkt-Impedanz“[3]), kann allerdings nicht für alle Frequenzen berechnet werden, wenn sie für eine Frequenz bekannt ist, da die hierzu notwendigen Bestimmungsstücke bei einem so unzugänglichen Gebilde, wie es der schwingungsfähige Ohrapparat darstellt, kaum zu ermitteln sein dürften; das einzige praktisch mögliche Verfahren ist daher die Messung der Trommelfellimpedanz (die also definitionsgemäß mit der Antriebsimpedanz des schwingungsfähigen Ohrsystems identisch ist) bei allen in Betracht kommenden Frequenzen.

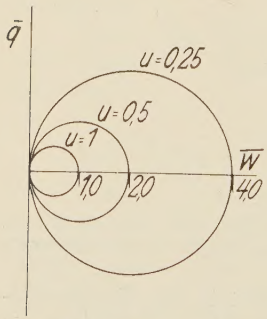


Fig. 1. Kreise gleicher Übertragung

In Fig. 1 ist eine graphische Darstellung der Größe $u$ in Abhängigkeit von $\bar{w}$ und $\bar{q}$ gegeben. Die Punkte, für die der Übertragungsfaktor einen bestimmten konstanten Wert hat, ordnen

1) Die Anpassung spielt hier die gleiche Rolle wie bei der Leistungsaufnahme eines sekundärseitig belasteten Transformators.

2) J. Tröger, Phys. Ztschr. **31**. S. 26. 1930.

3) Vgl. z. B. K. Schuster i. Hdb. der Experimentalphysik XVII/2. („Technische Akustik“, hsg. v. E. Waetzmann S. 25).

sich auf Kreisen an, die symmetrisch zur $\bar{w}$-Achse gelegen sind und die $\bar{q}$-Achse im Nullpunkt berühren.

Der Einfluß, den die bei der Trommelfellbewegung mitschwingende Mediummasse und der Strahlungswiderstand des Sekundärfeldes auf die Größe von $u$ ausüben, ist nur für die höchsten Tonfrequenzen merklich. Die Berechnung ergibt, daß $\bar{w}$ um $\frac{\pi \cdot F}{\lambda^2}$, $\bar{q}$ um $\frac{16R}{3\sqrt{2}\lambda}$ erhöht wird ($\lambda$ = Wellenlänge, $R$ Trommelfellradius); für den in der vorliegenden Untersuchung experimentell geprüften Frequenzbereich ist die Korrektur bedeutungslos.

### § 4. Bestimmung der Schwellendrucke

Bei der Wahl einer geeigneten Methode zur Aufnahme größerer Meßreihen von Schwellendruckwerten fallen neben theoretischen auch praktische Gesichtspunkte entscheidend ins Gewicht. Einwandfreie und in sich vergleichbare Resultate sind wegen der hohen Anforderungen an die Aufmerksamkeit und körperliche Frische der Versuchsperson nur dann zu erzielen, wenn das Meßverfahren hinreichend einfach ist und alle Störungen auf ein Mindestmaß eingeschränkt werden können. Die Ausschaltung äußeren Lärmes vom Ohr des Beobachters erweist sich im *offenen Schallfeld* auf jeden Fall schwieriger als im eng abgeschlossenen Schallfeld. Die hinreichende Vermeidung stehender Wellen im Versuchsraum ist eine weitere, im allgemeinen nur durch umfangreiche Maßnahmen zu erfüllende Voraussetzung dieser Beobachtungsweise.

In der Untersuchung (I)[1]) wurde eine Anordnung, die sogenannte „Schallmeßkammer" für Messungen im offenen Schallfeld angegeben; sie entstand aus dem Bestreben, den im vorigen Abschnitt geschilderten Schwierigkeiten durch möglichst weitgehende Trennung von Schallfeld und Untersuchungsraum zu begegnen. Gegen dieses Gerät hat Waetzmann[2]) Bedenken erhoben. Die nach Abschluß von (I) fortgeführten Arbeiten ergaben in der Tat, daß die Durchführung des Grundgedankens in einwandfreier Weise nicht möglich ist. Zunächst wurde festgestellt, daß zur Verhütung von Reflexionen die Qualität des Materials der Kugelhaube nicht ausreichte. Es konnten nun zwar mit Hilfe einer Schicht aufrecht in den Filz eingesteckter Bündel tierischer Federn die Reflexionen fast vollkommen vermieden werden[3]), so daß die Voraussetzung einfacher Kugelwellen in der Kammer mit großer Annäherung erfüllt war; infolge dieser Maßnahmen mußte aber der nach außen führende Tubus sehr stark verlängert werden. Dies führt zu folgenden Nachteilen: Zunächst kann der Einfluß der Rohrleitung auf den ins Ohr gestrahlten Energiebetrag auch für tiefe Frequenzen nicht mehr vernachlässigt werden, sondern ist (unter Berücksichtigung der Trommelfellimpedanz)

1) § 6 S. 963 ff.
2) E. Waetzmann, Ann. d. Phys. [5] **10**. S. 846. 1931.
3) Der Absorptionskoeffizient wurde bei 1000 Hz zu 96,5 % bestimmt.

von Fall zu Fall zu berechnen. Schwerwiegender aber ist die Beobachtung, daß in Tuben von größerer Länge stets ein schwaches Rauschen auftritt. Diese Erscheinung setzt die Sicherheit der Beobachtungen stark herab.

Bei Hörschwellenmessungen im *abgeschlossenen Schallfeld*, d. h. bei dicht ans Ohr gepreßtem Schallgeber, können zwar mit relativ einfachen Mitteln die rein akustischen Störungen ausgeschaltet werden, doch treten unter Umständen andere Erscheinungen auf, die die Messungen beeinträchtigen. So können schwache Induktions- und Geräuschströme[1]), die einen empfindlichen Schallgeber noch eben hörbar erregen, Täuschungen hervorrufen. Eine sehr wesentliche Fehlerquelle ist auch die bei mangelhafter Abdichtung auftretende Schalldruckverminderung, zumal, wenn mit ihr eine Rückwirkung auf den Betriebszustand der Schallquelle Hand in Hand geht.[2])

Die Schwierigkeiten des letzteren Verfahrens lassen sich durch Wahl eines geeigneten Schallgebers sehr stark herabmindern; es sind an diesen hauptsächlich die folgenden beiden Anforderungen zu stellen:

1. Das Übertragungsmaß — d. h. das Verhältnis von erzeugtem Schalldruck zur elektrischen Klemmenspannung — muß so gering sein, daß an der Hörschwelle der Betriebsstrom wesentlich größer ist als die verbleibenden Störströme.

2. Das Übertragungsmaß muß für alle Frequenzen stabil sein und darf durch geringfügige Änderungen im „Sitz“ des Schallgebers am Ohr nicht wesentlich beeinflußt werden.

Diese Bedingungen erfüllen die *Thermophone* in ausgezeichneter Weise. Ihr Übertragungsmaß ist wesentlich geringer als das der Telephone wohl jeglicher Bauart; da sie kein mechanisches Schwingungssystem besitzen, entbehren sie aller Labilitäten einer resonanzfähigen Schallquelle. Besonders wertvoll ist auch die einfache Auswertbarkeit auf Grund leicht zu gewinnender Daten.[3])

Die Untersuchung (II) ergab, daß für exakte Meßzwecke nur die drahtbespannten Thermophone in Frage kommen. Die systematischen Schwellendruckbestimmungen, über die im folgenden berichtet werden wird, sind daher ohne Ausnahme mit Drahtthermophonen durchgeführt worden.

---

1) Vgl. § 6.

2) B. Langenbeck, Pflügers Arch. **226**. S. 39. 1930.

3) Wählt man das Hohlraumvolumen nicht zu klein ($> 1$ cm$^3$), so übt, wie G. v. Békésy gezeigt hat (Ann. d. Phys. [5] **13**. S. 126. 1932), die Trommelfellnachgiebigkeit praktisch keinen Einfluß auf den Schalldruck aus. Es ist also bei der Auswertung so zu verfahren, als ob der Hohlraum allseitig starr begrenzt wäre.

Die Auswertung der Messungen setzt eine Eichung voraus, über die bereits in (II) berichtet wurde; sie läßt sich auf Grund der korrigierten Schalldruckformel [II, Gl. (42)] noch weiter vereinfachen. Da nämlich die Temperatur des Leiters nicht mehr selbständig auftritt, ist die Bestimmung des Leiterwiderstandes in Abhängigkeit von der Temperatur nicht erforderlich; die elektrische Eichung reduziert sich hierdurch auf die Feststellung des Thermophonwiderstandes bei dem zur Vorheizung verwendeten Gleichstrom.

Die Versuchsanordnung zur Aufnahme von Schwellendruckwerten ist bereits in (II) beschrieben worden.[1]) Die Telephonzelle, in der sich die Versuchsperson während der Messungen befand, hielt den Störschall fast völlig zurück; infolgedessen war es möglich, während ruhiger Stunden auch am Tage zu beobachten. Im allgemeinen fanden die Messungen am späten Abend statt.

Die Beobachtungen wurden folgendermaßen durchgeführt: Der Versuchsleiter schließt und öffnet den Wechselstromkreis des Thermophons in unsystematischer Weise; gleichzeitig reguliert er allmählich den in das Thermophon eintretenden Wechselstrom herunter. Die Versuchsperson gibt ihm ihre Wahrnehmungen durch Lichtsignale an, die durch Niederdrücken einer Taste ausgelöst werden; solange sie einen Ton konstatiert, läßt sie die Signallampe aufleuchten, sobald ihre Empfindung aufhört, läßt sie die Signallampe erlöschen. Dieses völlig geräuschlose und die Aufmerksamkeit des Horchenden wenig beeinträchtigende Verfahren hat sich bei den Versuchen sehr gut bewährt.

Der größte Teil der Messungen wurde mit Hilfe eines Thermophons durchgeführt, in dessen Kammer zwei verschieden dimensionierte Wollastondrähte mit getrennten Zuführungen untergebracht sind.[2]) Es war so möglich, Kontrollbestimmungen ohne Absetzen der Kapsel vom Ohr durchzuführen. Die Reproduzierbarkeit der Einzelwerte ist befriedigend in Hinblick auf die den Schwellenmessungen ihrer Natur nach anhaftende Unsicherheit; die Häufigkeit größerer Abweichungen vom Mittelwert ($> 20\,\%$) ist gering, Abweichungen von mehr als $30\,\%$ treten nur ausnahmsweise auf.

Fig. 2 gibt eine Meßreihe in graphischer Darstellung wieder; es wurden Mittelwerte aus mehreren Messungen eingetragen. Fig. 3 ist das Audiogramm des rechten Ohres der gleichen Versuchsperson. Die Figg. 4 und 5 zeigen noch zwei

---

1) Vgl. (II) S. 410.

2) Vgl. (II) S. 427 („Doppelthermophon").

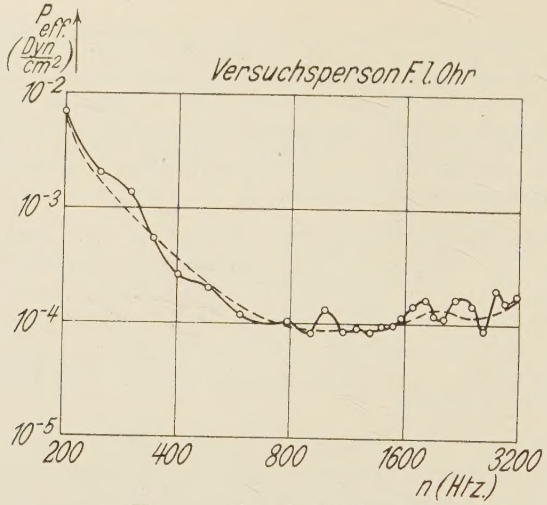


Fig. 2. Schwellendruckkurven

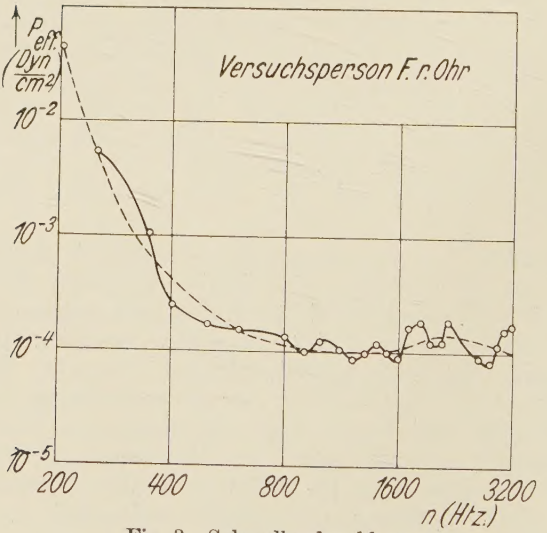


Fig. 3. Schwellendruckkurven

weitere Beispiele.[1]) In die Diagramme wurden gemittelte Kurven eingetragen, die den Allgemeinverlauf der Schwellendrucke deutlicher hervortreten lassen.

1) Vgl. hierzu auch die früher veröffentlichte Schwellendruckkurve (E. Waetzmann u. W. Geffcken, Phys. Ztschr. **34**. S. 234. 1933). Eine Schwellendruckkurve von ganz ähnlichem Verlauf hat dann H. Heinze (Schalltechnik **6**. S. 21. 1933) gefunden.

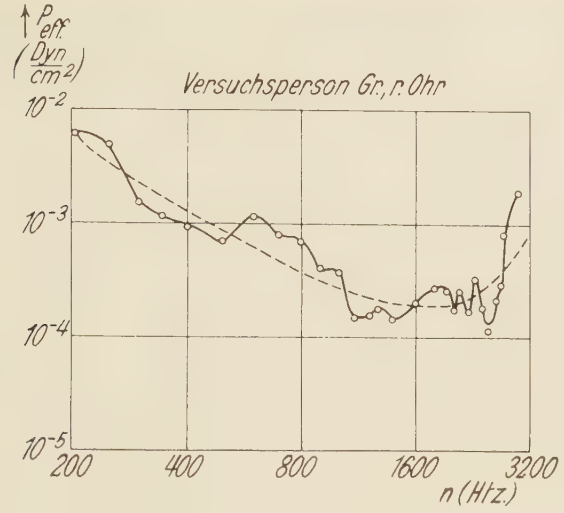


Fig. 4. Schwellendruckkurven

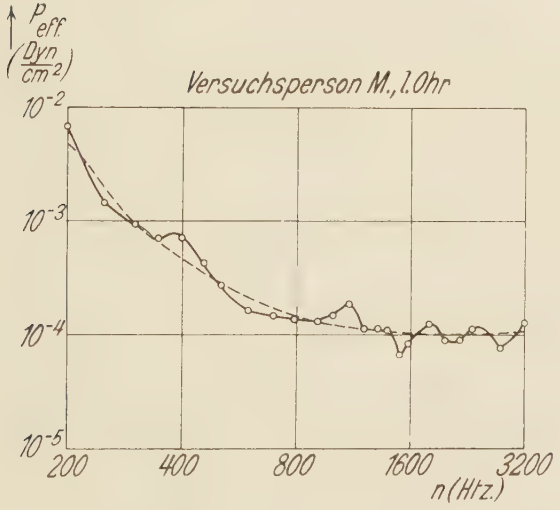


Fig. 5. Schwellendruckkurven

Aus dem gesamten Versuchsmaterial (etwa 1200 Druckschwellenwerte, die an zehn normalhörenden[1]) Personen in dem

1) Als „normalhörend" sind hier solche Personen zu verstehen, welche im täglichen Leben in ihrer Hörfähigkeit in keiner Weise behindert sind.

Frequenzbereich von 200—3000 Hz gewonnen wurden) ergibt sich folgendes Bild: Die Druckschwellenwerte fallen von etwa $10^{-3}$ Dyn/cm² bei 200 Hz bis etwa $10^{-4}$ Dyn/cm² bei 800 Hz ab und verharren in diesem Niveau bis nahe an 3000 Hz heran; in der Nähe der letztgenannten Frequenz ist meist wieder ein Ansteigen zu beobachten. In dem Bereich oberhalb 800 Hz zeigen sich ausgeprägte Schwankungen um die gemittelte Kurve. Hörlücken, d. h. Frequenzgebiete, innerhalb deren die Druckschwellenwerte sprunghaft um eine Zehnerpotenz oder mehr von dem der Nachbargebiete abweichen, konnten indessen nicht festgestellt werden.

In diesem Zusammenhang ist über eine auffallende physiologische Beobachtung bei den Schwellendruckmessungen zu berichten. Bei individuell bestimmten Frequenzen in dem Gebiet zwischen 1000 und 2000 Hz empfanden einige Versuchspersonen schon bei Schalldrucken, die wesentlich über den Schwellenwerten lagen, den Ton als tremolierend. Eine Möglichkeit zur Erklärung der Erscheinung ist folgende: Das untersuchte Ohr besitzt für die dargebotene Frequenz eine schmale Hörlücke; es werden daher die Nervenendigungen an denjenigen Fasern der Basilarmembran stärker erregt, welche den beiden benachbarten Frequenzen besonders guter Hörfähigkeit entsprechen (Fig. 6 *b′* und *b″*). Durch Überlagerung der beiden „Nebentöne“ entständen dann die Tremolos. Sehr scharfe Hörlücken könnten daher direkt nicht wahrgenommen werden, es wäre höchstens ihre Breite (*b″*—*b′*) aus der Anzahl der Schwebungen zu bestimmen.

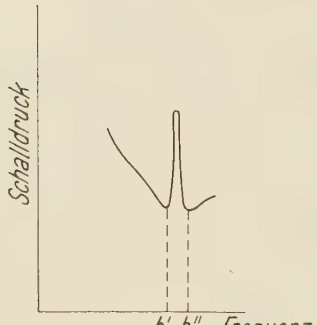


Fig. 6

Schmale, tiefeinschneidende Hörlücke als Erklärung des „Tremolierens“

### § 5. Bestimmung der Trommelfellimpedanzen

Für die Berechnung des Übertragungsfaktors ist die Kenntnis der beiden Komponenten $w$ und $q$ der Trommelfellimpedanz notwendig. Verfahren zur Bestimmung akustischer Widerstände sind in den letzten Jahren von mehreren Seiten angegeben worden, von denen sich allerdings nur wenige speziell für den hier in Frage kommenden Zweck eignen.

Als erster bestimmte West[1]) Ohrwiderstände; die von ihm verwendete Methode läßt keinen Schluß über die Phasenzustände direkt vor dem Trommelfell zu, sie kommt also für die hier vorliegende Aufgabe nicht in Betracht. v. Békésy[2]) teilt eine vor allem für Messungen bei tiefen Frequenzen anzuwendende Methode mit. Bestimmungen der Ohrimpedanz in dem gesamten akustisch wichtigsten Gebiet ermöglicht schließlich ein von Tröger[3]) angegebenes Verfahren; für die vorliegende Arbeit wurde daher dieses letztere herangezogen.

Die Trögersche Methode besteht in folgendem: In den Gehörgang der Versuchsperson wird das Ende eines schmalen Rohres eingeführt, in dessen anderes Ende ein Telephon Schall einstrahlt. Die mechanischen Eigenschaften des Trommelfells beeinflussen die akustischen Vorgänge in der Rohrleitung; die Durchrechnung der Verhältnisse auf Grund der akustischen Leitungstheorie zeigt, daß die Bestimmung des gesuchten mechanischen Widerstandes auf Relativmessungen der Druckamplitude und Druckphase in der Entfernung $\lambda/2$ vom Schallgeber zurückgeführt werden kann.

Die Versuchsordnung, welche sich in einigen Punkten von der von Tröger angewandten unterscheidet, ist in Fig. 7 dargestellt. Als Meßrohr (*MR*) dient ein Tubus von 6 mm lichtem Durchmesser, dessen Länge mit Hilfe exakt angepaßter Ansatz- und Zwischenstücke etwa in den Grenzen von 1—2 Metern beliebig verändert werden kann. An dem einen Ende ist als Schallquelle das Spezialtelephon von Wente und Thuras[4]) (*SQ*) angebracht, das andere Ende ist mit einer Olive (*O*) versehen, die dicht schließend in den Ohrkanal der Versuchsperson eingeführt wird. Zur Bestimmung des akustischen Zustandes im Rohr dient ein neuartiges Kompensations-

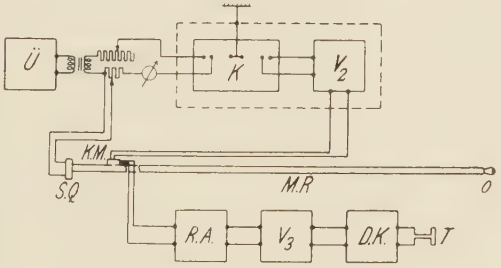


Fig. 7. Anordnung zur Aufnahme von Trommelfellimpedanzen

1) W. West, Post Office El. Eng. Journ. **21**. S. 293. 1929.
2) G. v. Békésy, Ann. d. Phys. **13**. S. 126. 1932.
3) J. Tröger, Phys. Ztschr. **31**. S. 26. 1930.
4) E. C. Wente u. A. L. Thuras, Journ. Acoust. Soc. of Am. **3**. S. 44. 1931.

mikrophon ($K\,M$), über das schon an anderer Stelle berichtet wurde[1]); es ist an dem Ort des ersten Druckbauches hinter der Schallquelle eingebaut. Die kleinen Dimensionen dieses Instrumentes ermöglichen es, die Meßstelle eng zu begrenzen. Den Wechselstrom zum Betrieb sowohl der Schallquelle als auch zur Durchführung der Kompensation der Membranbewegung des Kompensationsmikrophons liefert ein Überlagerungssummer ($\dot{U}$). Zur Regelung des Kompensationsstromes nach Amplitude und Phase dient ein Geygerscher Schleifdrahtkompensator ($K$)[2]); an seinem Ausgang liegt ein zweistufiger Verstärker ($V_2$), der einen hohen Eingangswiderstand besitzt, so daß er die an den Schleifdrähten abgegriffene Spannung verstärkt, ohne das Meßsystem zu belasten.

Das Kompensationsmikrophon enthält einen kleinen Kondensator, dessen Belegungen einerseits von der Membran, andererseits von einer festen Gegenplatte gebildet werden; dieser Kondensator ist an die Rieggersche Schaltung der „halben Resonanzkurve" angeschlossen ($R\,A$), an deren Ausgang ein dreistufiger Verstärker ($V_3$), hinter diesem eine Drosselkette ($D\,K$) und schließlich ein Telephon ($T$) liegen. Ist die Membran des Kompensationsmikrophons in Ruhe, so schweigt das Telephon. Diese Vorrichtung ermöglicht eine sehr genaue Überwachung der Kompensation.

Das Verfahren besteht nun darin, die den Schalldrucken an der Meßstelle der Rohrleitung proportionalen zur Kompensation erforderlichen Spannungsvektoren für eine Reihe von Rohrlängen zu bestimmen. Die Spitzen der Vektoren ordnen sich auf Kreisen an: der dem Koordinatenanfang am entferntesten liegende Punkt ist einer Resonanzrohrlänge zugeordnet, der dem Koordinatenanfang am nächsten liegende Punkt entspricht maximaler Verstimmung. Da der Dämpfungsverlust in dem schmalen Rohr von der Größenordnung der Absorption des Trommelfells ist, hat jeder Aufnahme am Ohr eine Meßreihe bei hartem Abschluß vorauszugehen, aus der die Dämpfung im Rohr bestimmt wird.

Die Sicherheit der Messungen ist von einigen Maßnahmen abhängig, die streng zu wahren sind. Undichtigkeiten des Meßrohres können die Resultate völlig verfälschen, besondere Sorgfalt wurde daher der Einpassung des Rohrendes in den

1) W. Geffcken, ENT **10**. S. 39. 1933; Phys. Ztschr. **34**. S. 237. 1933.

2) Der Meßbereich des Kompensators konnte nach Einbau eines zusätzlichen Ausgleichswiderstandes über 1500 Hz hinaus erhöht werden.

Gehörgang der Versuchsperson gewidmet. Durch Wahl geeigneter Oliven, die den individuellen Eigentümlichkeiten der Ohröffnung angepaßt waren, konnte in den meisten Fällen eine gute Abdichtung erzielt werden.

Wichtig ist ferner die Vermeidung von Kopplungserscheinungen zwischen Schallgeber und Rohr; aus diesem Grunde wurde das oben erwähnte Spezialtelephon, das bis zu hohen Frequenzen ein nahezu konstantes Übertragungsmaß besitzt, als Schallquelle benutzt. Abweichungen des Abstandes zwischen Schallgeber und erstem Druckbauch von dem Wert $\lambda/2$ wurden zunächst bei tieferen Frequenzen beobachtet. Durch Einfügen einer Metallscheibe, die in ihrer Mitte mit einer sehr schmalen Bohrung (Durchmesser 0,6 mm) versehen war, zwischen Telephon und Rohr konnte diese Erscheinung innerhalb des Meßfrequenzbereiches fast völlig beseitigt werden; die dem Rohr zugewandte Öffnung bildet dann die eigentliche Schallquelle[1]), deren Impedanz auch für die tieferen Frequenzen hoch ist.

Zur elektrischen Entstörung wurden alle die Maßnahmen durchgeführt, welche Tröger in seiner oben angeführten Arbeit beschreibt. Von großer Wichtigkeit ist hierzu auch die Wahl eines geeigneten Isoliertransformators zwischen Überlagerer und Kompensator; da nämlich der Sender durch die Batterien einpolig geerdet ist, muß ein kapazitiver Nebenschluß über die Erdung des Wechselstromkompensators durch einen lediglich induktiv übertragenden Transformator unterbunden werden.[2]) Ein empfindliches Kriterium auf die Beseitigung elektrischer Störungen stellt der Nullabgleich am Kompensator bei nicht akustisch erregter Membran des Kompensationsmikrophons dar. Es müssen dann im abgeglichenen Zustand beide Kontakte auf den Nullpunkten der Skalen stehen.

Bei tiefen Frequenzen ist diese Forderung gut zu erfüllen; bei den höheren Frequenzen (oberhalb 1000 Hz) verschieben sich dagegen die Abgleichstellungen gegenüber den Nullpunkten um einige Skalenteile. Bei Kommutierung des Kompensatoreinganges oder -ausganges dreht sich die Phase der Störspannung um 180° bei gleichbleibender Amplitude, die Abgleichspunkte liegen dann also symmetrisch zu den Skalennullpunkten auf den entgegengesetzten Skalenhälften. Die Zuverlässigkeit der Ablesungen ist in keiner Weise beeinträchtigt, sofern man die

1) Diese Vorrichtung wurde bereits von M. Thiesen (Ann. d. Phys. [4] **25**. S. 506. 1908) und später von F. Himstedt u. R. Widder (Ztschr. f. Phys. **4**. S. 355. 1921) für Präzisionsmessungen der Schallgeschwindigkeit angewendet.

2) Vgl. hierzu W. Geyger, Arch. f. Elektrot. **17**. S. 224. 1927. Sehr geeignet erwies sich der zerlegbare Transformator der Fa. Leybold-Köln, bei dem Primär- und Sekundärwicklung auf den beiden Schenkeln des Kernes für sich getrennt untergebracht sind.

Abgleichstellen bei akustisch nicht erregter Kompensationsmembran als Nullpunkte der Messungen betrachtet. Die Abweichungen von den Skalennullpunkten stellen die zur Kompensation der Störung notwendigen Spannungsvektoren dar; es wurden daher vor jeder Messung diese Nullpunktskorrekturen bestimmt.

Einer besonderen Prüfung wurde die Frage unterworfen, ob etwa eine Beeinflussung der Nullabgleichapparatur (Kondensator des Kompensationsmikrophons und Riegger-Schaltung) durch den kompensierenden Strom (Elektromagnet des Kompensationsmikrophons) stattfindet. Hierzu wurde die Membran des Mikrophons durch eine dicke, also nicht schwingungsfähige Eisenscheibe ersetzt: Das Abhörtelephon schwieg nunmehr auch bei starker Erregung des Elektromagnetsystems vollständig. Bei der normalen Anordnung beruht also der volle Effekt auf den Schwingungen der Membran.

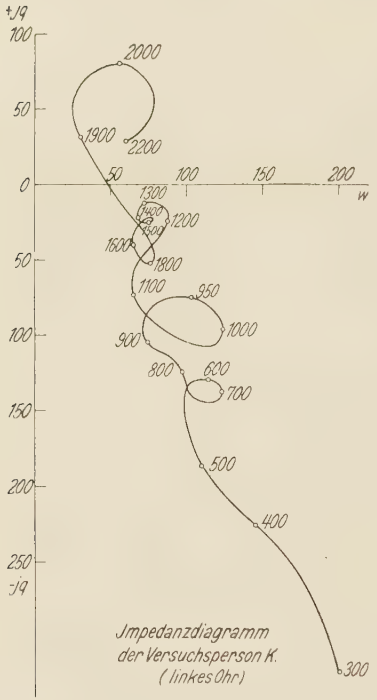


Fig. 8

Um schließlich die ganze Versuchsanlage zu kontrollieren, wurde sie zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten eines Materials benutzt, das bereits nach einer anderen Methode bei senkrechter Schallinzidenz untersucht worden war. Es ergab sich hierbei Übereinstimmung bis auf 1,4%.

In Fig. 8 ist ein charakteristisches Beispiel für eine Ohrimpedanzaufnahme wiedergegeben. Für die tiefsten Frequenzen ist die Impedanz vorwiegend elastisch und sehr groß, das Trommelfell wirkt nahezu als Druckempfänger. Die Kurve durchläuft zwischen 600 und 700 Hz eine Schleife, der bei höheren Frequenzen weitere sich zum Teil ineinander schlingende Schleifen folgen; der Kurvenzug überschreitet hierbei die reelle Achse.

Der Vergleich dieses Diagramms mit dem entsprechenden Trögers läßt als gemeinsames Charakteristikum einen scharfen

Abfall der elastischen Blindkomponente mit steigender Frequenz in den tieferen Tonlagen und der komplizierte verschlungene Verlauf in dem Gebiet höherer Frequenzen erkennen. Infolge der individuellen Verschiedenheiten der untersuchten Ohren zeigen im einzelnen die Impedanzkurven erhebliche Abweichungen voneinander.

Die Temperaturbeeinflussung der Luft im Rohr durch den Körper der Versuchsperson verändert — zumal bei höheren Frequenzen — die akustische Phase vor dem Trommelfell; die Einzelablesungen am Kompensator wurden daher möglichst rasch durchgeführt und stets nach einer kleinen Pause, während der die Versuchsperson ihr Ohr vom Tubus entfernt hielt, kontrolliert. In den meisten Fällen ergab sich zwischen diesen beiden Messungen vollständige Übereinstimmung. Die Olive konnte — wie hieraus ebenfalls hervorgeht — nach jeder Unterbrechung wieder in die gleiche Lage zum Trommelfell gebracht werden.

Eine der Versuchspersonen besitzt ein Ohr, welches infolge einer Mittelohreiterung vor langer Zeit ertaubte; eine neuerlich erfolgte ohrenärztliche Untersuchung ergab, daß das Trommelfell völlig verwachsen ist. Die Impedanzaufnahme zeigte nun, daß sich dieses Ohr genau so wie ein starrer, hart abgeschlossener Kanal verhält; damit ist ein experimenteller Beweis für die von v. Békésy[1]) theoretisch begründete Annahme geliefert, daß der Gehörgang als akustisch starr anzusehen ist.

Eine andere Versuchsperson hat die Fähigkeit, den Ohrmuskel (Tensor tympani) willkürlich zu spannen. Impedanzaufnahmen bei normalem und bei gespanntem Trommelfell zeigten eine starke Veränderung der Blindkomponente ($q$), während die Wirkkomponente ($w$) weit weniger beeinflußt wird (Tab. 1). Der Übertragungsfaktor verringert sich durch das Spannen um etwa 30%.

v. Békésy[2]) beobachtete eine Impedanzzunahme, wenn auf das Ohr von außen ein stationärer Überdruck ausgeübt wird. Es liegen dann ganz analoge Verhältnisse vor wie hier, denn auch in diesem Fall ist das Trommelfell über das normale Maß nach dem Innenohr hin vorgespannt.

Tabelle 1

| Versuch | $w$ | $q$ | $u$ |
|---|---|---|---|
| Trommelfell normal . . . . | 86 | − 19,7 | 0,460 |
| „ gespannt . . . | 97 | 58 | 0,314 |

1) G. v. Békésy, Ann. d. Phys. [5] **14**. S. 51. 1932.
2) G. v. Békésy, Ann. d. Phys. [5] **13**. S. 126. 1932.

### § 6. Ergebnisse; Kritik

In Tab. 2 sind Schwellendrucke, Übertragungsfaktoren, Reizschwellen ($L$) und Empfindlichkeitswerte ($1/L$) der Versuchsperson K. zusammengestellt. Aus dieser Übersicht geht in erster Linie hervor, daß die Ohrempfindlichkeit bei tieferen Frequenzen keineswegs sehr stark gegenüber den Werten bei mittleren Hörfrequenzen abfällt, sofern man die Aufnahmefähigkeit des schwingungsfähigen Ohrapparates in Betracht zieht. Für die tiefen Tonlagen besitzt das Trommelfell eine höhere Steifigkeit, der in das innere Ohr gelangende Energieanteil ist geringfügiger als bei mittleren Frequenzen.

Tabelle 2

Versuchsperson K., linkes Ohr

| $n$ | $p_{\text{eff.}}$ Dyn/cm² | $u$ | $L$ erg/cm²/sec | $E = 1/L$ cm²/sec/erg |
|---|---|---|---|---|
| 300 | $1{,}4 \cdot 10^{-3}$ | 0,058 | $9{,}1 \cdot 10^{-10}$ | $1{,}1 \cdot 10^{9}$ |
| 400 | $6{,}7 \cdot 10^{-4}$ | 0,084 | $3{,}0 \cdot 10^{-10}$ | $3{,}3 \cdot 10^{9}$ |
| 500 | $4{,}1 \cdot 10^{-4}$ | 0,096 | $1{,}3 \cdot 10^{-10}$ | $7{,}7 \cdot 10^{9}$ |
| 600 | $1{,}8 \cdot 10^{-4}$ | 0,153 | $4{,}0 \cdot 10^{-11}$ | $2{,}5 \cdot 10^{10}$ |
| 700 | $2{,}0 \cdot 10^{-4}$ | 0,149 | $4{,}8 \cdot 10^{-11}$ | $2{,}1 \cdot 10^{10}$ |
| 800 | $1{,}4 \cdot 10^{-4}$ | 0,162 | $2{,}6 \cdot 10^{-11}$ | $3{,}9 \cdot 10^{10}$ |
| 900 | $1{,}8 \cdot 10^{-4}$ | 0,185 | $4{,}9 \cdot 10^{-11}$ | $2{,}1 \cdot 10^{10}$ |
| 1000 | $1{,}3 \cdot 10^{-4}$ | 0,208 | $2{,}8 \cdot 10^{-11}$ | $3{,}5 \cdot 10^{10}$ |
| 1100 | $1{,}1 \cdot 10^{-4}$ | 0,278 | $2{,}7 \cdot 10^{-11}$ | $3{,}7 \cdot 10^{10}$ |
| 1200 | $8{,}2 \cdot 10^{-5}$ | 0,439 | $2{,}4 \cdot 10^{-11}$ | $4{,}2 \cdot 10^{10}$ |
| 1300 | $7{,}0 \cdot 10^{-5}$ | 0,555 | $2{,}2 \cdot 10^{-11}$ | $4{,}6 \cdot 10^{10}$ |
| 1400 | $8{,}2 \cdot 10^{-5}$ | 0,540 | $2{,}9 \cdot 10^{-11}$ | $3{,}4 \cdot 10^{10}$ |
| 1500 | $9{,}8 \cdot 10^{-5}$ | 0,510 | $3{,}9 \cdot 10^{-11}$ | $2{,}5 \cdot 10^{10}$ |
| 1600 | $1{,}8 \cdot 10^{-4}$ | 0,460 | $1{,}2 \cdot 10^{-10}$ | $8{,}3 \cdot 10^{9}$ |
| 1800 | $1{,}4 \cdot 10^{-4}$ | 0,370 | $5{,}8 \cdot 10^{-11}$ | $1{,}7 \cdot 10^{10}$ |
| 1900 | $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ | 0,690 | $1{,}2 \cdot 10^{-10}$ | $8{,}0 \cdot 10^{9}$ |
| 2200 | $1{,}7 \cdot 10^{-4}$ | 0,570 | $1{,}3 \cdot 10^{-10}$ | $7{,}5 \cdot 10^{9}$ |

Die hier mitgeteilten Empfindlichkeitswerte sind bis zu zwei Zehnerpotenzen größer als die der Untersuchung (I).[1]) Daß dieser auffallende Unterschied nicht etwa auf einer individuellen Eigentümlichkeit der untersuchten Ohren beruht, zeigten vergleichende Messungen nach beiden Methoden an denselben Versuchspersonen.

1) Neuerdings teilt H. C. Huizing (Dissert. Groningen 1932) Hörschwellenwerte mit, welche in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen (I) stehen. H. benutzte ebenfalls elektromagnetische Telephone, deren Membranamplitude er mit Hilfe eines empfindlichen Hochfrequenzverfahrens bestimmte. Die Impedanz des Trommelfells wird nicht berücksichtigt.

Im § 4 wurden Bedingungen aufgestellt, denen ein Schallgeber genügen muß, um sichere Hörschwellenmessungen in Ohrlage zu ermöglichen. Von großer Wichtigkeit ist vor allem der erste der an jener Stelle genannten Punkte. In welchem Maß er erfüllt ist, ergibt sich durch Vergleich der Reizströme ($i_{\text{reiz.}}$) mit den Störströmen. Setzt man die restlose Ausschaltung induktiver Beeinflussungen des Meßkreises durch andere Stromkreise voraus, so verbleiben dennoch die sog. „Geräuschströme", die als Folge der im Schallgeberleiter vorhandenen Wärmebewegung der Moleküle und freien Elektronen auftreten. Nach Johnson[1]) sind die statistischen Schwankungen von der Größenordnung $i_{\text{stat.}} = \frac{10^{-8}}{\sqrt{R}}$ ($R$ Leiterwiderstand). Als Kriterium für die Eignung einer Methode zu Hörempfindlichkeitsbestimmungen kann also der Quotient $i_{\text{reiz.}}/i_{\text{stat.}}$ angesehen werden.

Bei den Thermophonmessungen waren die geringsten Reizströme, welche beobachtet wurden, etwa $5 \cdot 10^{-6}$ Amp. bei einem Instrumentenwiderstand von 60 $\Omega$; hieraus ergibt sich $i_{\text{reiz.}}/i_{\text{stat.}} \sim 3{,}5 \cdot 10^{3}$. Das Thermophon ist also so unempfindlich, daß Störungen dieser Art nicht auftreten können. Sehr viel ungünstiger liegen die Verhältnisse für Messungen mit Resonanztelephonen. Die in (I) bestimmten Reizströme reichen bis zu $2{,}5 \cdot 10^{-10}$ Amp. herab, bei einem (reellen) Widerstand von 2000 $\Omega$, so daß $i_{\text{reiz.}}/i_{\text{stat.}} \sim 1$ wird. Empfindlichkeiten von der Größenordnung der mit Hilfe von Thermophonen gefundenen Werte sind mit Resonanztelephonen daher prinzipiell nicht erreichbar; offenbar war die Hörschwelle durch Störungen der beschriebenen Art bei den Telephonmessungen verdeckt.[2])

Kann auch der Einfluß der Geräuschströme durch Wahl eines hinreichend unempfindlichen Schallgebers ausgeschaltet werden, so besteht doch eine unverrückbare Grenze, über die hinaus keine Messungen mehr möglich sind; sie ergibt sich aus den spontanen Druckschwankungen der Luft als unmittelbarer Begleiterscheinung der Brownschen Molekularbewegung. Sivian und White[3]) fanden für die mittlere Druckschwankung:

$$\overline{P} = \left[\frac{8\pi\varrho k T}{3c}(f_2^{\,3} - f_1^{\,3})\right]^{1/4} \text{Dyn/cm}^2 .$$

1) I. B. Johnson, Phys. Rev. [2] **32**. S. 97. 1928. Der Effekt kann nach H. Nyquist (Phys. R. [2] **32**. S. 110. 1928) zur Berechnung der Boltzmannschen Konstante dienen.

2) Auch die Bedingung (2) § 4 entscheidet zugunsten der Thermophonmethode.

3) L. J. Sivian u. S. D. White, Journ. of the Acoust. Soc. of Am. **4**. S. 306. 1933.

An der Hörschwelle verschwindet das Unterscheidungsvermögen für Reize verschiedener Frequenz; es sind daher als Grenzen $f_2$ bzw. $f_1$ die Frequenzen einzusetzen, welche das Gebiet maximaler Hörempfindlichkeit umfassen, d. h. den Bereich, in dem die Schwankungserscheinungen eine Rolle spielen. Sivian und White nehmen $f_1 = 1000$ Hz und $f_2 = 6000$ Hz an; mit diesen Werten ergibt sich $\bar{P} = 5 \cdot 10^{-5}$ Dyn/cm$^2$.

Die obere Grenze ist offenbar sehr hoch gegriffen und beruht auf Messungen im freien Schallfeld, bei denen insbesondere durch die Resonanzen des Gehörganges bei 3000 und 6000 Hz[1]) eine Schalldruckerhöhung vor dem Trommelfell stattfindet. Setzt man $f_2 = 3000$ Hz — was für Messungen im abgeschlossenen Schallfeld sicher nicht zu tief ist — so errechnet sich $\bar{P} = 1{,}8 \cdot 10^{-5}$ Dyn/cm$^2$.

In den vereinzelten Fällen ergaben sich bei den Schwellendruckmessungen Werte bis herab zu $5 \cdot 10^{-5}$ Dyn/cm$^2$, also bis an die Grenze der Störeinflüsse; immerhin waren auch diese extremen Resultate noch innerhalb des oben (§ 4) angegebenen Fehlerbereiches reproduzierbar. Es kann daher festgestellt werden, daß die Empfindlichkeit sehr guter Ohren bis in die Nähe der statistischen Schwankungen des Luftdruckes reicht, d. h. bis zur Grenze, unterhalb derer von akustischen Vorgängen im eigentlichen Sinne nicht mehr die Rede sein kann. In Fig. 9 ist die Empfindlichkeitskurve der Versuchsperson *K* und die Kurve von Wien[2]) eingetragen. Bei einem Vergleich der Empfindlichkeiten muß die Verschiedenartigkeit der ihnen zugrunde liegenden Definitionen[3]) berücksichtigt werden.

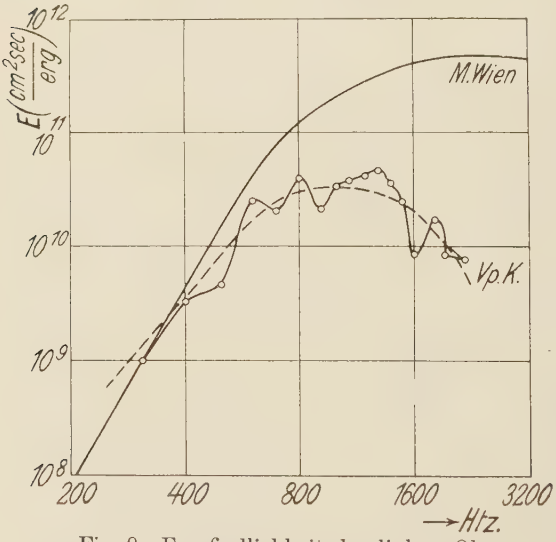


Fig. 9. Empfindlichkeit des linken Ohres der Versuchsperson K. im Vergleich zur M. Wien schen Kurve

1) G. v. Békésy, Ann. d. Phys. [5] **14**. S. 55. 1932.
2) M. Wien, Pflügers Archiv **97**. S. 1. 1903.
3) Vgl. § 2.

Die Umwertung der Wienschen Werte auf die dieser Arbeit zugrunde gelegte Begriffssetzung würde einerseits mit Hilfe der v. Békésyschen Korrekturen[1]) in dem Gebiet der höheren Frequenzen die Empfindlichkeiten verkleinern; andererseits käme durch Einführen der Übertragungsfaktoren eine Vergrößerung der Empfindlichkeiten bei tiefen Frequenzen zustande. Zusammengenommen hätten diese Maßnahmen also einen wesentlich flacheren Anstieg der Empfindlichkeitskurve zur Folge.

Dieses Resultat ist vor allem in Hinblick auf ein Bedenken interessant, welches vor langer Zeit Wien auf Grund seiner Ergebnisse gegen die Resonanztheorie des Hörens erhob und das bis jetzt noch nicht zerstreut werden konnte.[2]) Wien ging hierbei von einer grundlegenden Äußerung aus, die v. Helmholtz in seinem Werk über die Tonempfindungen macht. Es heißt dort[3]): „Wird ein einfacher Ton dem Ohr zugeleitet, so müssen diejenigen Cortischen Bögen, die mit ihm ganz oder nahe hin im Einklang sind, stark erregt werden, alle anderen schwach oder gar nicht. Es wird also jeder einfache Ton von bestimmter Höhe nur durch gewisse Nervenfasern empfunden, und verschieden hohe Töne werden verschiedene Nervenfasern erregen." Wien wandte hiergegen ein, daß die gegenüber dem dargebotenen Ton stark verstimmten Fasern keinesfalls in vollständiger Ruhe verharren können, sondern — wenn auch mit sehr kleiner Amplitude — erzwungene Schwingungen ausführen. Eine kleine Amplitude an einer Stelle hoher Nervenempfindlichkeit kann aber u. U. eine stärkere Empfindung hervorrufen als eine große Amplitude an einer Stelle geringer Nervenempfindlichkeit. Wien hatte nun zwischen den tieferen und den mittleren Tonfrequenzen ganz enorme Empfindlichkeitsunterschiede gefunden; es erschien daher unverständlich, daß tiefe Töne subjektiv überhaupt als solche wahrgenommen werden können und nicht durch hohe Tonempfindungen verdeckt werden.[4])

Gegen diese Beweisführung ist einzuwenden, daß die Wienschen Empfindlichkeitswerte keineswegs mit den Nervenempfindlichkeiten identifiziert werden dürfen, da die ihnen zugrunde liegende Definition sich ausdrücklich auf die Vorgänge

1) G. v. Békésy, Ann. d. Phys. [5] **14**. S. 51. 1932.
2) M. Wien, Wüllner-Festschrift S. 28 (Leipzig bei Teubner 1905).
3) H. v. Helmholtz, Tonempfindungen S. 243.
4) O. Fischer (Ann. d. Phys. [4] **25**. S. 118. 1908) versuchte den Widerspruch auf Grund anatomischer Befunde am inneren Ohr zu lösen; doch mag es zweifelhaft erscheinen, ob allein aus dem Aufbau des inneren Ohres sichere Schlüsse über die subtilen Einzelheiten der Hörvorgänge gezogen werden dürfen.

im freien Schallfeld bezieht und die Schallaufnahme durch das äußere Ohr außer acht läßt. Die den vorliegenden Ergebnissen zugrunde liegende Definition verbürgt eine weit bessere Näherung an die Nervenempfindlichkeit. Der Verlauf der Kurve $K$ (Fig. 8) dürfte jedenfalls nicht mehr im krassen Widerspruch zur Resonanztheorie stehen; um jedoch über diese Frage volle Klarheit zu erlangen, wären noch eingehende Messungen bei den Frequenzen unterhalb 300 Hz erforderlich, da in diesem Gebiet die Steilheit der Wienschen Kurve am größten ist.

### § 7. Zusammenfassung

Die Reizschwelle der Hörempfindung wird aus zwei voneinander unabhängigen Versuchsreihen bestimmt, nämlich aus Druckschwellen- und Trommelfellimpedanzmessungen. Die Druckschwellen werden mit Hilfe von Thermophonen ermittelt, deren Theorie (Wente) in einer früheren Arbeit (II) geprüft und verbessert wurde. Zur Bestimmung der Trommelfellimpedanzen diente die Methode von Tröger.

Die Empfindlichkeiten der untersuchten Ohren liegen in der Größenordnung $10^9$—$10^{10}$ [$cm^2 sec/erg$] innerhalb des Frequenzbereiches 300—2200 Hz. Auffallend sind die ausgeprägten Schwankungen der Empfindlichkeiten um eine gemittelte Kurve (Fig. 9). Es werden die durch statistische Schwankungserscheinungen eventuell zustande kommenden Störungen näher erörtert. Die Hörempfindlichkeit einiger Beobachter ist für bestimmte Frequenzen so groß, daß die Grenze der spontanen Luftdruckschwankungen nahezu erreicht wird. Es wird dargelegt, daß der Einfluß der Trommelfellimpedanzen auf den Verlauf der Empfindlichkeitswerte zur Überwindung eines Bedenkens beitragen dürfte, das Wien auf Grund seiner Messungen gegen die Resonanztheorie des Hörens erhob.

Herrn Professor Waetzmann bin ich für die Anregung zu der Arbeit, für seine wertvollen Ratschläge und für seine Teilnahme an zahlreichen Versuchsreihen zu großem Dank verpflichtet. Besonderen Dank schulde ich weiterhin den Herren Dr. K. Schuster, Dipl.-Ing. L. Keibs und cand. ing. E. Franke.

Ein Teil der Versuchsanlagen konnte aus Mitteln der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft und der Helmholtzgesellschaft bestritten werden; die Notgemeinschaft gewährte mir zudem ein Forschungsstipendium. Beiden Stellen danke ich für ihre wertvolle Unterstützung bestens.

# Lebenslauf

Am 18 Januar 1903 wurde ich, Wilhelm Heinrich Werner Geffcken, als Sohn des Hochschulprofessors Dr. H. Geffcken und seiner Ehefrau Marianne geb. Schill-Klien zu Rostock in Mecklenburg geboren. Meine höhere Schulausbildung erhielt ich auf dem Friedrich-Wilhelms-Gymnasium in Köln, auf dem Realgymnasium in der Kreuzgasse in Köln und schließlich auf dem Schiller-Realgymnasium in Leipzig; an der letztgenannten Anstalt legte ich zu Ostern 1923 das Abiturientenexamen ab. Vom Sommersemester 1923 bis zum Sommersemester 1927 studierte ich an der Technischen Hochschule zu Dresden Technische Physik und bestand am 21. November 1927 das Diplomexamen. Vom Januar 1928 bis März 1930 war ich als Laboratoriumsingenieur bei der Firma Electroacustic in Kiel tätig. Anfang April 1930 trat ich in das Physikalische Institut der Technischen Hochschule in Breslau ein, wo ich mich mit der Durchführung von Untersuchungen über akustische Schwellenwerte und hiermit im Zusammenhang stehende Probleme befaßte.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig 35/34